

Title	V Coreの問題(2) : 特に超高压物性,惑星進化の観点からみた(<特集>地球と物性研究)
Author(s)	島津, 康男
Citation	物性研究 (1964), 1(6): 477-490
Issue Date	1964-03-07
URL	http://hdl.handle.net/2433/85571
Right	
Type	Departmental Bulletin Paper
Textversion	publisher

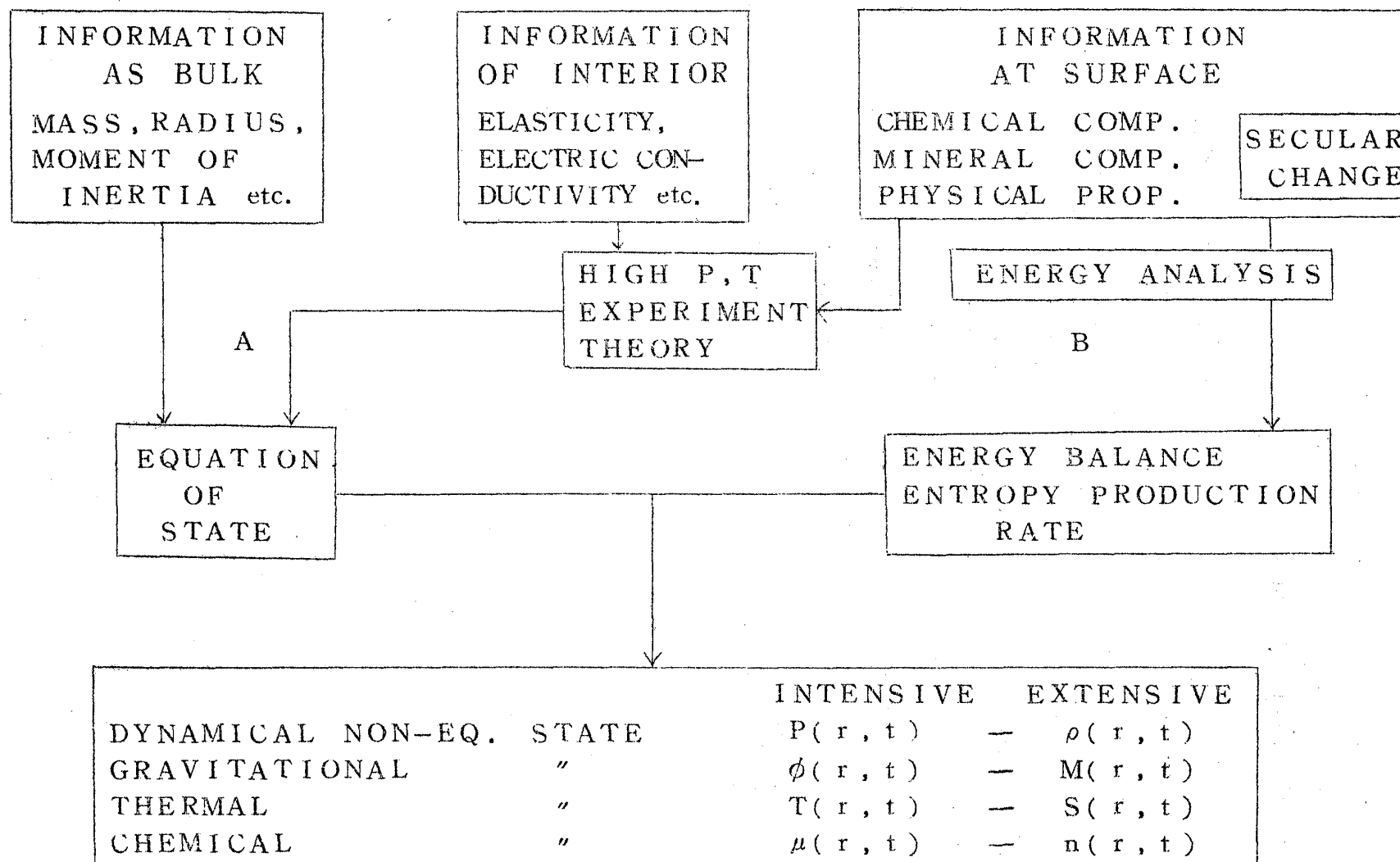
V Core の 問 題 (2)

特に超高圧物性，惑星進化の観点からみた

島 津 康 男(名大理)

§ 1. Introduction

地球の中で energy がどう分布しているか，及びその時間的变化はどうかを知ることができれば，状態とその進化が判つたといえる。普通は energy そのものよりその一次微分量 state variable が得やすい。そこで $\rho = f(P, T, n)$ (n は物質を指定する) の形で表される equation of state を得るのが第一目標となる。しかし，mass, energy の変化を示す "field equation" も忘れてはならない。field equation は時間を explicit に含み，地球の進化を記述するための核心となる。⁶⁾ 以上の事情を図 5-1 に示す。



§ 2. 物性常数

二種類あることに注意する。

(1) energy $\xrightarrow{\text{微分}}$ state variable $\xrightarrow{\text{微分}}$ 物性常数として与えられるもの。地球の状態を指定するのに特に基本的なのは：

$$\text{thermal expansion } \alpha = \frac{1}{V} \frac{\partial V}{\partial T} \quad \text{silicate で } 10^{-5},$$

$$\text{metal で } 10^{-5}$$

$$\text{specific heat } C = T \frac{\partial S}{\partial T} \quad \text{silicate で } 0.2 \sim 0.3,$$

$$\text{metal で } 0.1 \sim 0.2$$

$$\text{incompressibility } K = -V \frac{\partial P}{\partial V} \quad \text{silicate で } 10^{12},$$

$$\text{metal で } 10^{12}$$

これらは物質による差が小さく， P ， T dependence は linear に近いから，order としては known とみてよい。

Mie-Grüneisen の状態方程式を仮定すると，

$$r = \frac{\alpha K_T V}{C_V} = \frac{\alpha K_S V}{C_P} = \frac{1}{3} - \frac{1}{3} \frac{\partial}{\partial \log \rho} \left(\frac{1}{V_p^3} + \frac{1}{V_s^3} \right) \quad (5-1)$$

より， V_p ， V_s が判れば α/C の分布が判る。〔Ⅳ参照〕

(2) kinetic parameters

Irreversible process に現われるもので，

$$\text{heat flow } Q = -\kappa \text{ grad } T$$

$$\text{electric current } I = -\sigma \text{ grad } V$$

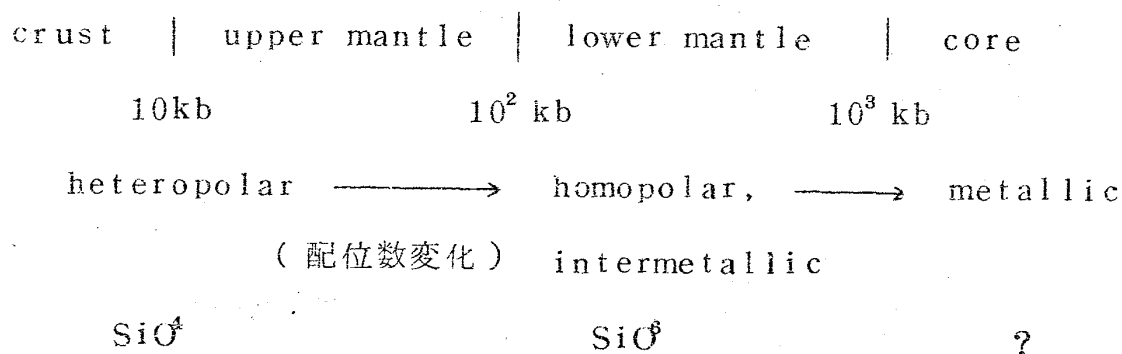
$$\text{diffusion } J_d = -D \text{ grad } n \text{ 等。}$$

これらの parameters は activation energy に関係し物質（結晶構造）dependence が大きく， P ， T によつて exponential に変るので，その estimation は難かしい。しかし，これらは field equation に現われ，

進化の記述に重大な意味をもつ。

§ 3. 高圧化学からみた core の状態

固体に 10^3 kb の圧力をかけると, その internal energy の変化 ($\sim 1\text{ev}$) は chemical bond の cohesive energy ($1\sim 4\text{ev}$) と同程度になるので, 10^3 kb で化学の領域をこえる。core はまさにその圧力領域にある。



core の状態はまた stellar interior の問題につながる。

§ 4. Core の化学組成

core, mantle の化学組成としては,

stony meteorite (隕石) — mantle

iron meteorite (隕鉄) — core

と対応させて考えるのが常識的である。しかも stony meteorite 中の chondrite^{*}) を地球の始源物質とする考えがある。(VI 参照)

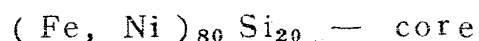
core を $\text{Fe}_{15}\text{Ni}_1$ と仮定し, mantle を $(\text{Mg}_9\text{Fe}_1)_2\text{SiO}_4$ あるいは $(\text{Mg}_9\text{Fe}_1)\text{SiO}_3$ としたときの elements の abundance の比を, mantle を chondrite としたばあいと比較したのが表 5-1 である。

* 球粒状隕石。隕石の 90% 以上を占める。組成は均質で, 高圧型 pyroxene と olivine とが主要鉱物。

表 5 - 1

mantle	chondrite	$(\text{Mg}_9 \text{Fe}_1)_2 \text{SiO}_4$	$(\text{Mg}_9 \text{Fe}_1) \text{SiO}_3$
core	$\text{Fe}_{15} \text{Ni}_1$	$\text{Fe}_{15} \text{Ni}_1$	$\text{Fe}_{15} \text{Ni}_1$
$(\text{Mg} + \text{Fe} + \text{Ni}) / \text{Si}$	1.65	3.3	1.8
Fe / Mg	0.71	0.78	1.04

これからみると $(\text{Mg}_9 \text{Fe}_1) \text{SiO}_3 \rightarrow \text{mantle}$ の方がよい。しかしこれでは $\rho(P)$ があわないし, MSiO_3 (pyroxene) は高温高压では spinel + stishovite に分解するらしい。そこで, core に Si をまわして



としてつじつまを合せる考えもある。

しかし隕鉄にこのような Si がふくまれている例は知られていない。隕鉄は Fe-Ni の合金とみてよく, face-centered cubic の組織をもつものと, body-centered cubic のものとの両方がある。phase diagram からみて数百度 $^{\circ}\text{C}$ 以下でゆつくり冷却したものと思われ, 地球の core との対応を考えるさい注意すべきである (隕鉄の始源状態又は母天体の大きさと地球の大きさとの差)。隕石の母天体の大きさについてははつきり判っていない。diamond の存在から火星又はそれ以上の大きさを考える人もあるが, 地球への落下の際の shock pressure によつてできたとすればそのように大きな天体を必要としない (しかし $\text{Mg}_2 \text{SiO}_4$ の spinel はみつかつていない)。又数百度からのゆつくりした cooling はせいぜい半径 2~300 km の天体を必要とするが, 隕鉄表面の凹凸からみて天体の破片ではなく, もともとその大きさだつたと考える人もある。

地球全体としては O—Si—Fe—Mg (これだけで 90%) を考え, その 10^3 kb, 数 1000 度での state を調べればよい。⁸⁾

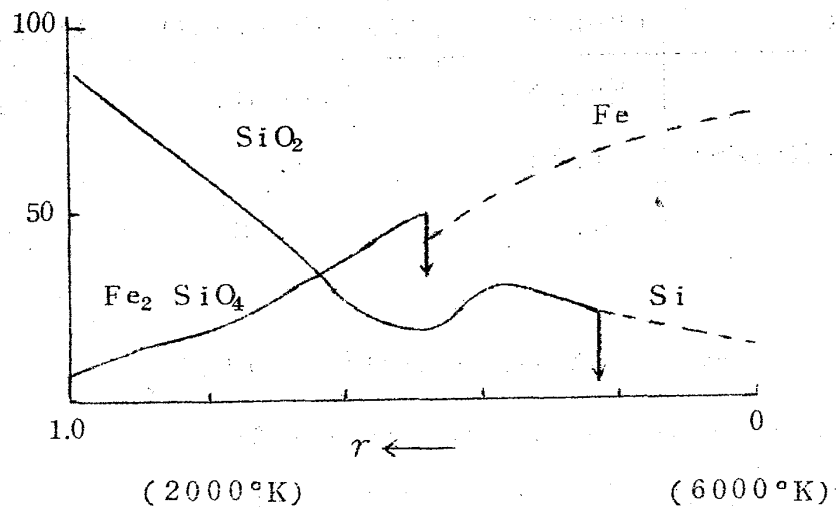


図 5-2. 地球を熱平衡にあるとして決めた elements の分布
(Shimazu)

中でも O は体積の 90 % を占める。(高圧ではそうは限らないが。) 軽元素は表面に濃縮している。

trace elements として重要なのは radioactive elements で、地球の thermal history に重要な関係をもつ。

layer structure は

chemical affinity (+ electron degeneracy)

gravity differentiation

のかねあい決る。trace element では前者がかち、Fe では後者がかつて core が形成されたように見える。

§ 5. Equation of states

(1) Degenerate electron gas (Thomas-Fermi model)

これは $P \gtrsim 10^5$ kb でよいとみられる。状態方程式は

$$P = \alpha_1(Z) \rho^{\frac{5}{3}} - \alpha_2(Z) \rho^{\frac{4}{3}} \quad (5-2)$$

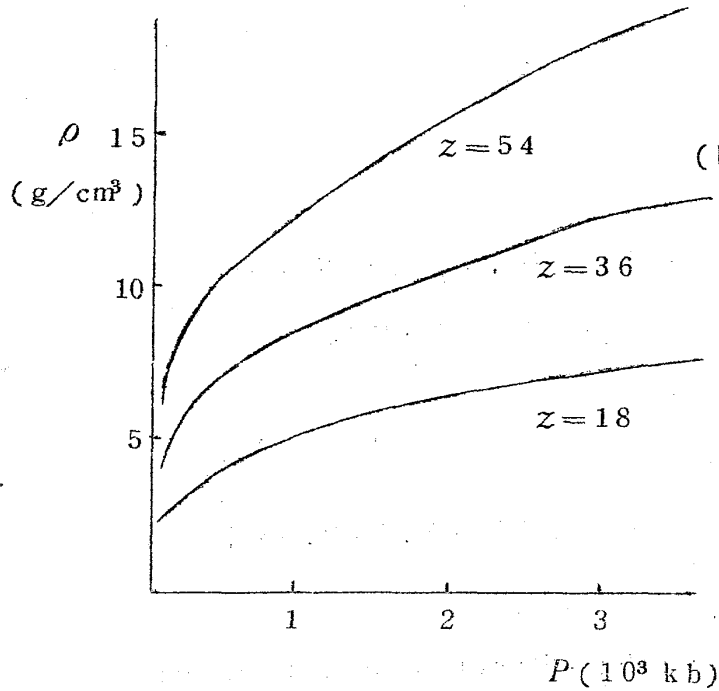


図 5 - 3

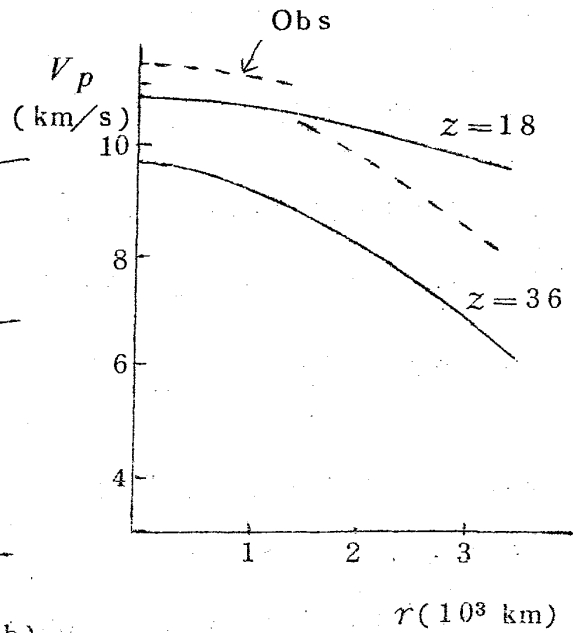


図 5 - 4

(Z ; atomic number) で与えられる。種々の Z について (5-2) によって $P \sim \rho$ の関係を図 5-3 に示した。地球の内部でも (5-2) がよいとして $r - V_p$ の関係を求めると図 5-4 の実線のようになり、観測値 (点線) と比較すると, core では $Z = 20 \sim 30$ で大体あう。 $Z_{\text{Fe}} = 26$ だから, これは若干 Si が mix していることを示している(?)。但し, core でも圧力は 10^3 kb の程度で, Thomas-Fermi model は適用できないので, この結果がどれだけ意味をもつか判らない。

(2) Classical ion-ion interaction

ion-ion interaction を

$$E_{\text{int}} = -A \left(\frac{r_0}{r} \right)^m + B \left(\frac{r_0}{r} \right)^n \quad (5-3)$$

とすると, 状態方程式は

$$P = A' \left[- \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^{\frac{m}{3}} + \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^{\frac{n}{3}} \right] \quad (5-4)$$

となる。また

$$\frac{\partial K_T}{\partial P} = \frac{m+n+6}{3}$$

ただし，地震波は adiabatic process と考えられ， V_p の分布からは $\partial K_S / \partial P = 3.3$ が与えられる。 $\partial K_T / \partial P$ と $\partial K_S / \partial P$ の間には

$$\frac{\partial K_T}{\partial P} = \frac{\partial K_S}{\partial P} + 5T\alpha r \quad (5-5)$$

の関係があるので (Ⅳ参照)， $T\alpha r \sim 4 \times 10^3 \times 10^{-5} \times 1.2 = 0.05$ より $\partial K_T / \partial P \sim 3.7$ ， $m+n \sim 5$ を得る。

Finite strain theory による Murnaghan-Birch の equation of state (Ⅳ参照) は

$$P = \frac{3}{2}K_0 \left[\left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^{\frac{7}{3}} - \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^{\frac{5}{3}} \right] \quad (5-6)$$

となる。これは moderate pressure で成り立ち，extreme pressure で正しいとみられる (5-2) との間ができていない。

§ 6. Transition to metallic phase

core を Fe(+Ni+Si) とする考えが popular であるが，Ramsey (1949) は core を silicate の high-pressure metallic phase と考えた。彼によると core-mantle boundary が sharp なことは物質の不連続ということでは説明できない。 $\partial K / \partial P$ が連続なことも証拠の一つにあげている。

mantle - ground state $\rho_1 \sim 6$, energy E_1

core - metallic state $\rho_2 \sim 9$, " E_2

boundary の pressure $P = 1.4 \times 10^2$ kb

とすると Gibbs の free energy が等しいことから

$$E_2 - E_1 = P(V_1 - V_2) \simeq 12 \text{ eV/mol}$$

となつて excitation energy として unreasonable な値ではない。また metallic phase への転移にともない融点が下ることも予想されるから, core の fluid state を保証しそうにみえる。問題は silicate の転移を理論か実験で示すことにある。

高圧相への転移圧力については, つぎのような計算がある。

表 5-2 高圧相への転移 (理論)

	$P_{\text{trans.}}$ (Mbar)	
H	0.7 ~ 2	
He	28 ~ 191	fcc \rightarrow 1s, 2p overlap
Fe		$\text{Fe}^{16} + (3s^2 \text{ 以上が overlap})$
MgO	0.7 ~ 1.5	O-O effect $>$ Mg-O

このうち, H, He は H, He でできているとみられる木星, 土星などの内部構造の問題と関連して興味を持たれており, とり扱いかいのもつとも簡単な物質でもあるので, 理論的での進歩 (より厳密な計算) がのぞまれる。

H, He の $\rho(P)$ の計算結果とそれを用いて求めた木星の内部構造¹⁾を図 5-5 に示す。中心圧は木星で 110 Mbar, 土星で 55 Mbar となつている。

Fe の高圧相については, Henry²⁾ が $3s^2$ 以上の electron はすべて conduction electron になるとして計算した。結果は図 5-6 のようになる。

core を ion + free electron の mixture と考えれば ρ, P, T を与えることによつて electron density を知ることができ (Fe, Silicate のいずれであつても), electric conductivity などが計算できる。

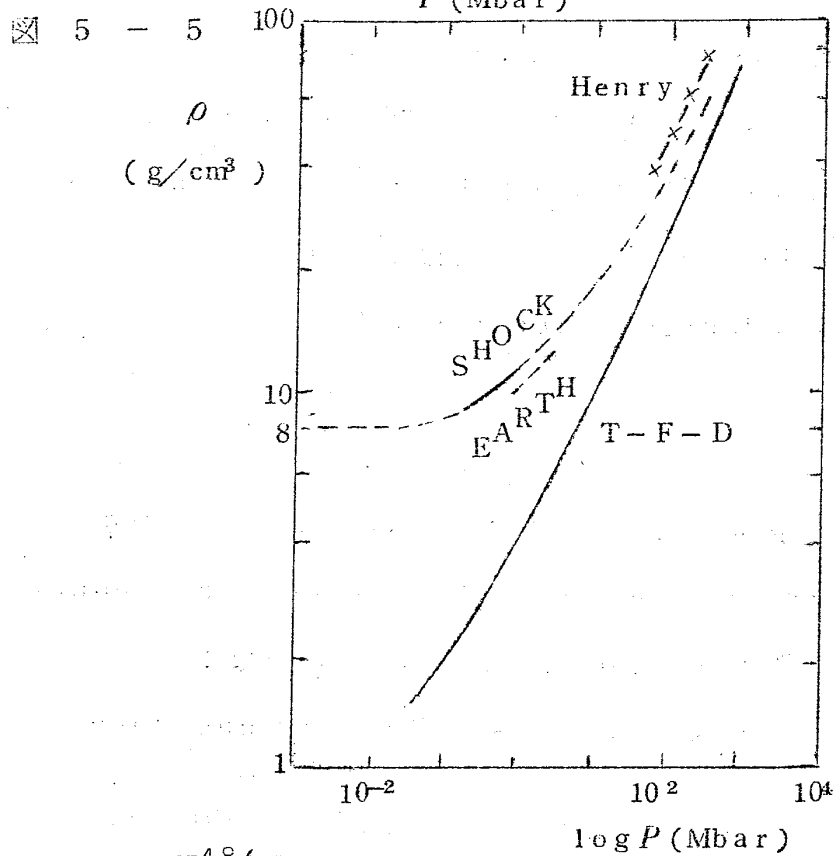
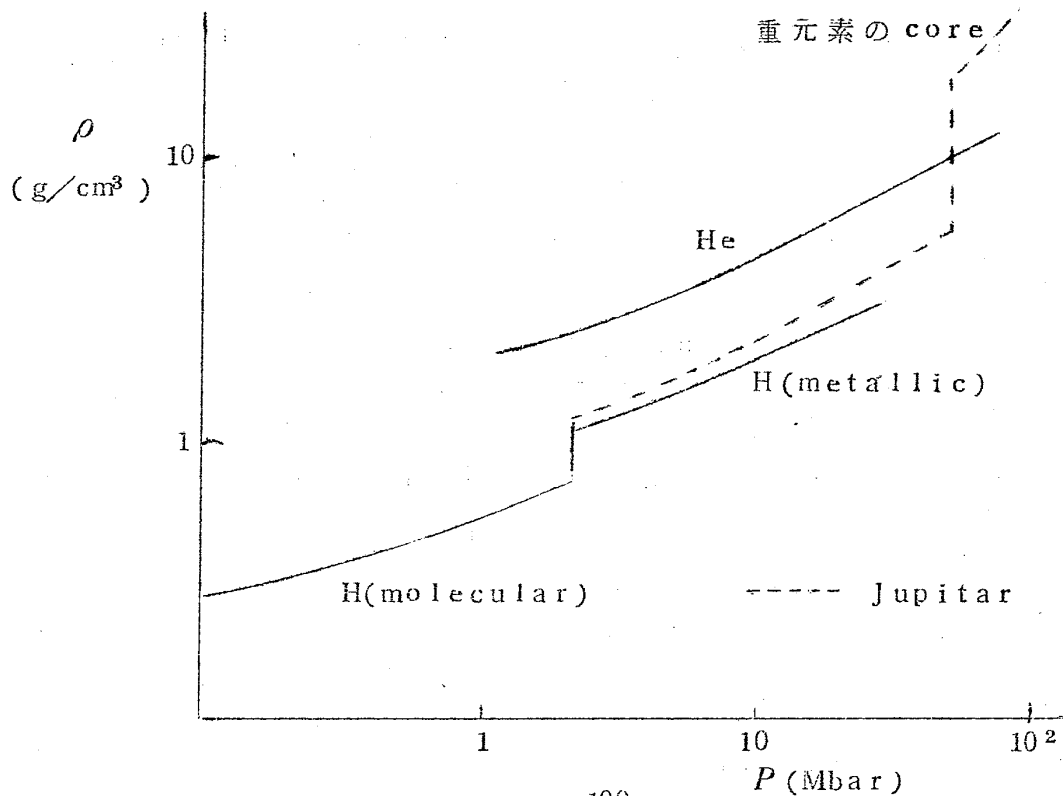
³⁾⁴⁾ $Z = 10 \sim 30$ についての結果は:

$$\text{viscosity } \eta \sim 10^{-3} \text{ poise (gas core), } 10^{-2} \sim 10^{-1} \text{ poise}$$

(liquid core)

electric conductivity $\sigma \sim 2 \sim 4 \times 10^3 \Omega^{-1} \text{ cm}^{-1}$

thermal conductivity $\kappa \sim 0.05 \sim 0.5 \text{ cal/cm} \cdot \text{deg} \cdot \text{sec}$



mantle の値と比べると, mantle は core に対して thermal, electrical に insulator と考えてよい。地震波の減衰から mantle では $\eta < 10^9$ poise と推定されている。

core を silicate とすると radioactive material は core にも mantle 程度に存在するだろうし, Fe だとすると mantle に濃縮しているはずで, thermal state を考える上で重要な問題である。熱源が mantle と core とに一樣に分布しているとすれば, 到底現在の thermal state は説明し得ない。(Ⅶ参照)

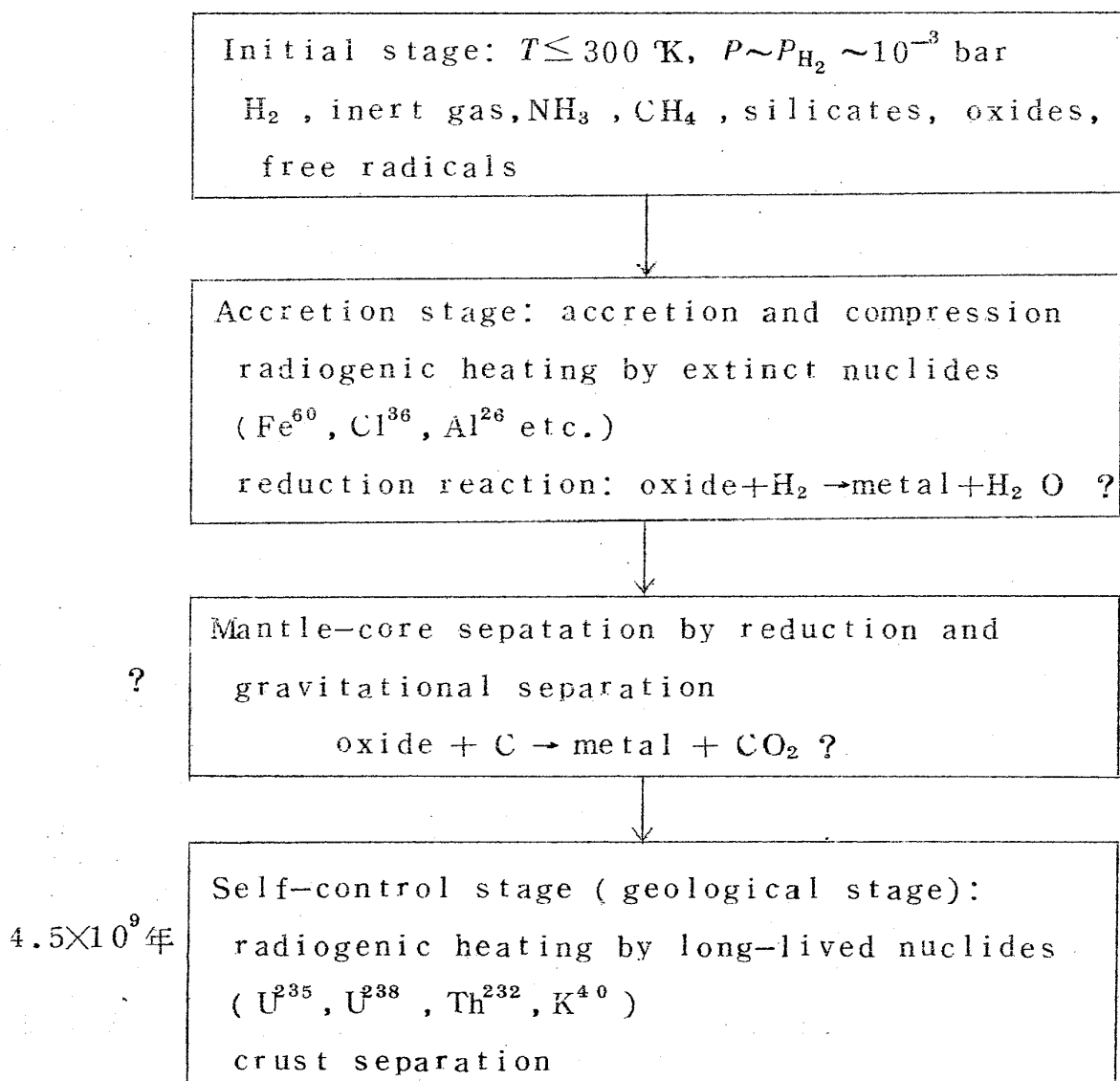
§ 7. core の成因⁶⁾¹⁰⁾ (Ⅶ参照)

core の組成・状態の問題は, その発生の mechanism にまでさかのぼることを要求する。ここでは地球は低温の cosmic dust の凝集によつてできたという考えにたつ。もし core が silicate の metallic phase なら, 凝集の process 進行中に中心圧が適当な critical value に達した時に core が発生し, ぼう大な内部エネルギーを放出したことになる。もし core が Fe (+Ni+Si) なら homogeneous chondrite material (oxidized state) から reduction と gravitational differentiationによつて生じたことになる。differentiation の際放出される gravitational energy は 2×10^{38} erg に達し, U^{238} , U^{235} , Th^{232} , K^{40} の含有量から期待される radiogenic heat の全量 ($\sim 1.5 \times 10^{38}$ erg) より大きい位である。しかし, reduction は吸熱反応であり, core を Fe, Ni としてこれがすべて oxide 又は silicate からの reduction によるとすれば, 0.8×10^{38} erg を必要とし, radiogenic heat と同程度である。地表・大気にふくまれている各種の unstable element の isotope ratio から, 地球の年令は 4.5×10^9 年程度と推定される。しかもそれらの存在量は 4.5×10^9 年前にすでに隕石の推定初期値に等しい。従つて宇宙存在比から

出発すれば 4.5×10^9 年前にはすでに mantle への濃縮が行なわれていたこと，すなわち mantle と core の分離が完成又は相当程度進行していたことを示す。ただし core は Fe-Ni と考えての話である。

Core の発生の問題はこのように地球生成初期の問題につながる。地球の形成プロセスを schematic に示したのが次の表である。

表 5 - 3



地球が現在の mass にまで凝縮して以后は，すべての変化は自己の energy でまかなわれねばならない。故に reduced された Fe が凝縮の前から太陽系

にあつたか、それとも oxide, silicateが地球形成後に reduce したかは、地球のその後の thermal stateに決定的な差を生ずる。いずれにしても進化の径路は、gas escape, accumulation & gravitational separation, radiogenic heating, redox reaction の相互作用によつて決められる。表に示したように、もし initial state で metal phase がなく、凝集と同時に reductionによつて core ができたとすれば、エネルギー収支、エントロピー生成速度からみて 10^8 年以内にこのプロセスは完了しなければならない。何故なら

(1) reduction に要するエネルギーをまかなうため、半減期 10^7 年以下の extinct nuclideによる発熱が effective であることが必要。

(2) effective に mantle-core を分離するには、reduction によつて発生する gas を表面に運び出し、かつ effective な対流がおこるほど全体が heat up する必要。

(3) radiation による熱の逸散を防ぐには、早期に insulator としての大気が発生する必要がある；このために重力場が急速に大きくなることが必要。

だからである。

一方 dynamo mechanism によつて地球磁場が維持されているとしても (VI 参照)，はじめには太陽又は宇宙空間磁場が地球に trap されて magnetohydrodynamical pinch によつて増巾される必要がある。凝集期の trap には metal dust が存在した方が有利である。ここでも又 Fe が metal でいたが oxide でいたかが重要になる。宇宙存在比のような大量の H の下では明らかに Fe は還元されているが、太陽系の生成→地球の形成の時期の物理化学をもつと調べる必要がある。

なお密度差による重力分離は一種の対流 (二成分系対流とよばれるもの) の形で実現され、普通の一成分系での熱対流とは比べものにならない強力な

熱輸送をとまなう(温度差による密度差は $\rho\alpha\Delta T \sim 5 \times 10^{-5} \times 5 \times 10^3 = 0.25$ 以下なのにsilicateとFeの密度差は5程度に達する)。従つてthermal stateにも大きな影響をもたらす。

References

- 1) de Marcus, W.C., (1958) : The constitution of Jupiter and Saturn. *Astron. Jour.* 63, 2-28.
- 2) Henry, J.F. (1959) : Énergie de cohésion et équation d'état du Fer a haute pression. *Bull. Roy. Soc. Belg. Cl. Sci.* 45, 553-574.
- 3) Жаркоб, B.H. (1962) : *Физика ядра зем. Труд. ННУ. Физ. зем.* No.20 1-49.
- 4) Miki, H. (1952) : Physical states of the earth's core. *Jour. Phys. Earth* 1, 67-74.
- 5) Shimazu, Y. (1954) : Equation of state of materials composing the earth's interior. *Jour. Earth Sci. Nagoya Univ.* 2, 15-172.
- 6) 島津康男 (1959) : 地球内部の構造の歴史的発展, 地球科学 No.44, 27-33.
- 7) 島津康男 (1963) : 地質現象のエネルギー解析 地球の進化を熱力学的にあつかうための一手段として, 地球科学 No.65, 24-32.
- 8) Shimazu, Y. (1956) : Chemical equilibrium within self-gravitating planets and internal constitution of the earth. *Jour. Phys. Earth* 4, 1-6.
- 9) 島津康男 (1962) : 地球深部の物質 科学 32, 526-529.
- 10) Shimazu, Y. (1963) : Thermodynamical aspects of terrestrial evolution. *Jour. Earth Sci. Nagoya Univ.* 11 (in press)